

UNIVERSITA' DI GENOVA
Istituto di Meccanica Applicata alle Macchine
Rapporto IIR.70.AL.146

(NASA-CR-127251) CAPACITIVE TRANSDUCERS
A.L. Lucifredi (Genoa Univ.) Sep. 1970 N72-27235
24 p CSCI 09A
G3/09 Unclass
90001

"I TRASDUTTORI CAPACITIVI"

To be published by "Tecniche dell' Automazione"



LEFRESK

Dr.Ing. Aleramo LUCIFREDI

Settembre, 1970

ESKO ACC

I TRASDUTTORI CAPACITIVI

Sommario

Nella presente nota vengono analizzate e discusse le applicazioni, la teoria, le forme costruttive dei trasduttori capacitivi. Particolare risalto viene dato all'esame dei circuiti di utilizzazione, esaminati criticamente. Infine l'autore espone il suo parere relativamente ai vantaggi ed agli svantaggi di tale tipo di trasduttori, specie dal punto di vista di un ingegnere meccanico. L'articolo non si prefigge soltanto il fine di fornire un'informazione, ma anche lo scopo di suggerire criteri di scelta, sia in caso di acquisto, sia in caso di progetto.

INTRODUZIONE

I trasduttori capacitivi in Italia sono assai poco noti e vengono molto raramente utilizzati. E' opinione diffusa, dovuta forse alla carente disponibilità sul mercato di tali tipi di trasduttori, che essi debbano essere riservati ad applicazioni molto particolari; a parere dell'autore, essi invece presentano delle caratteristiche che li rendono sotto certi aspetti superiori ai tipi resistivi ed induttivi; inoltre i campi di applicazione, presenti o futuri, sono numerosissimi. Fra essi ricordiamo:

- misure di spostamento;
- misure di pressione;
- misure di forza;
- misure di coppia;
- misure di velocità;
- misure di accelerazione;
- misure di livello;
- misure di temperatura;
- misure di concentrazione di un liquido in un solvente;
- misure di frequenza di spostamento;
- misure di vibrazioni;
- misure di intensità sonora;
- misure di rugosità superficiale;
- misure di umidità.

NOTA : Quest'articolo fa parte di una ricerca svolta dall'autore presso l'Università di Stanford, California nell'ambito di una borsa di studio ESRO-NASA.

Si hanno inoltre applicazioni in molti altri campi; citiamo i sistemi di misura per la prova nondistruttiva di laminati plastici rinforzati con fibre di vetro (misura di spessore e del rapporto fra le percentuali di vetro e di resina per unità di area) (*), le misure di eccentricità di organi rotanti o oscillanti in macchine utensili automatiche, la misura del profilo istantaneo delle ali degli aerei, le misure di corsa dei pistoni, le misure dello spostamento della tavola mobile di macchine utensili, il conteggio di pezzi, le prove di durata a flessione, gli indicatori di prossimità, i sensori degli strumenti di navigazione inerziale per avvertire il disallineamento del piano del rotore rispetto all'involucro della girobussola. I trasduttori capacitivi sono poi particolarmente adatti alle misure mediante telemetria.

TEORIA E FORME COSTRUTTIVE

Per una disamina dei pregi e dei difetti di tale tipo di trasduttori, è necessario premettere un'esposizione sommaria delle leggi che li governano (aspetto teorico) e delle possibili forme costruttive (aspetto pratico).

La legge caratteristica di un condensatore piano è:

$$C = K \frac{S}{d} \quad (1)$$

dove C è la capacità, K una costante che dipende dal dielettrico e dalle unità di misura, S la superficie affacciata di un'armatura, d la distanza fra le armature.

Se le armature sono più di due, in generale N, la formula diviene:

$$C = K (N-1) \frac{S}{d} \quad (2)$$

La figura 1 raccoglie le espressioni della capacità dei condensatori che trovano più utile impiego nei trasduttori capacitivi,

(*) Vedasi riferimento 9.

per il caso di unità singole, cioè a due soli piatti. Si è chiamata ϵ la costante dielettrica.

Le forme costruttive adottate praticamente, mirano a far variare i termini al secondo membro della (1), ossia K (cioè ϵ), S , d , per ottenerne variazioni di capacità. A parere dell'autore, tuttavia, forse non sarebbe fuori luogo considerare la possibilità di ulteriori forme costruttive, per speciali applicazioni in cui necessitino indicazioni a livelli discreti, ottenute facendo variare anche il numero N dei piatti, come suggerito dalla (2). La figura 2 compendia schematicamente le principali forme costruttive attualmente in uso. Le unità differenziali sono in genere preferibili alle unità singole. Per quanto riguarda quelle che abbiamo chiamato unità speciali, la configurazione dentata presenta ovviamente, come illustrato in figura 3, la massima capacità quando i denti sono affacciati sugli altri denti e la minima quando sono affacciati sulle scanalature. La configurazione dentata è ottima sia per grandi spostamenti lineari (macchine utensili), sia per spostamenti angolari (torsimetri). La configurazione a dielettrico comprimibile prevede elettrodi che possono essere rigidi o flessibili; il dielettrico può essere, ad esempio, costituito da gomma; trasduttori capacitivi a dielettrico comprimibile hanno trovato ottime applicazioni in campo biologico e medico. La configurazione a rotolamento presenta un elettrodo flessibile, mobile, ed un elettrodo rigido, fermo, ricoperto da un sottile strato di isolante, la legge di variazione della capacità può essere fissata entro ampie possibilità di scelta, in fase di progetto, agendo sulla forma sia dell'elettrodo fermo, da un lato, sia dell'elettrodo mobile, dall'altro.

Un'altra caratteristica costruttiva, assai poco nota, è, a parere di chi scrive, di notevolissimo interesse: si possono realizzare unità di misura tridirezionali, cioè misurare spostamenti nelle 3 direzioni; ciò è particolarmente utile in asservimenti di posizione. Per far ciò, lo schema, che sostanzialmente consiste in 3 coppie di unità differenziali, si concretizza fisicamente in una

sfera metallica costituente una delle armature, contenuta in un'altra sfera metallica cava; quest'ultima è divisa in 6 parti uguali, fra loro isolate, che costituiscono, a due a due, le 3 coppie di unità differenziali di cui sopra. Le sei parti in cui è diviso l'alloggiamento sferico esterno possono essere pensate come ottenute proiettando dal centro della sfera gli spigoli di un cubo inscritto.

Un'altra caratteristica è molto importante: spesso un'armatura del condensatore può essere formata dallo stesso corpo in esame.

Riveste interesse l'espressione della forza attrattiva F fra i piatti costituenti gli elementi di un condensatore. Essa è :

$$F = \frac{1}{2} \frac{V^2 C^2}{d} = K' \frac{S V^2}{d^2} \quad (3)$$

dove V è il valore efficace della tensione, K' è una costante che dipende dal dielettrico e dalle unità di misura e dove gli altri simboli sono gli stessi delle precedenti equazioni.

Qualora si tratti di unità differenziali, quando l'elemento mobile è centrato la forza agente è nulla, perchè forze uguali ed opposte si elidono. Attribuendo uno spostamento rispetto alla posizione centrata, per spostamenti non troppo grandi, l'espressione della forza è data da:

$$F = \frac{V^2 C_0 (2 d_0 \Delta d - \Delta d^2)}{(d_0^2 - \Delta d^2) (d_0 - \Delta d)} \quad (4)$$

dove C_0 e d_0 sono i valori in corrispondenza della posizione centrata. La figura 4 riporta l'andamento ed i valori numerici della forza, in caso concreto di unità differenziale di alta precisione, in cui la minimizzazione della forza era una specifica essenziale; come si può vedere si è ottenuto che la forza agente sia veramente in fima.

CIRCUITI DI RIVELAZIONE

Notevole importanza ai fini delle caratteristiche di un sistema di misura di tipo capacitivo riveste il circuito di rivelazione. Vi sono vari metodi per trasformare la variazione di capa-

cità in un segnale di tensione o di corrente e la loro scelta va fatta con oculatezza, in quanto per lo più questo è lo stadio del quale emergono le maggiori difficoltà. Tralasciando di parlare di alcuni metodi, come i metodi elettrometrici o i metodi basati sulla misura del tempo di carica e scarica, perchè non forniscono un segnale istantaneo e continuo nel tempo, si possono classificare i principali circuiti come segue:

- circuiti a modulazione di ampiezza (ponti, divisori di tensione, etc.);
- circuiti a modulazione di frequenza;
- circuiti risonanti;
- circuiti a diodi (ponti a doppio T);
- circuiti in corrente continua;
- circuiti speciali.

A) Circuiti a modulazione di ampiezza

Il più comune è il ponte in corrente alternata, nelle sue varie possibili modificazioni. Con riferimento alla figura 5, consideriamo il caso in cui sia variabile solo una delle due capacità presenti nel ponte; se inizialmente il ponte è bilanciato, per $\Delta C \ll C$

il segnale alternato d'uscita E_u è proporzionale a ΔC . Nel caso in cui il trasduttore capacitivo sia costituito da un'unità differenziale (ad esempio un'unità differenziale di misura di spostamento o un trasduttore di pressione differenziale); entrambe le capacità sono variabili; in posizione centrata l'uscita è zero, altrimenti nasce un segnale; si noti che dalla fase del segnale si può conoscere il vero dello spostamento (o della differenza di pressione). Un'uscita in corrente continua, sensibile al verso della direzione, può essere ottenuta tramite una convenzionale demodulazione sensibile alla fase e un filtraggio. Il circuito a ponte, se è ottimo per la misura assoluta di capacità, rivela delle caratteristiche poco desiderabili nell'utilizzazione come circuito di rivelazione per trasduttori capacitivi. Innanzitutto si può mettere a terra soltanto un circuito, cioè o il circuito di uscita o il

circuito di alimentazione del ponte; ciò dà luogo a problemi di schermatura e di messa a terra. Inoltre nel caso assai frequente, specie in registrazioni o telemetria, in cui si desideri un segnale d'uscita in corrente continua, si ha che il diodo o i diodi, dovendo processare segnali molto deboli, operano nel tratto iniziale della loro caratteristica, cioè nel tratto dove il loro funzionamento è carente. D'altra parte, amplificare il segnale prima del raddrizzamento accresce la complessità e può far nascere del rumore.

Un'altra possibile configurazione, che però non è il tradizionale circuito a ponte, è rappresentata in figura 6 ed è questo lo schema che più frequentemente è usato negli strumenti di navigazione inerziale.

Un altro circuito a modulazione di ampiezza per unità capacitivie differenziali è quello indicato in figura 7; esso va considerato come uno dei migliori per l'applicazione a trasduttori capacitivi. La legge che lo governa è:

$$I = \frac{j \omega a v \Delta c}{a+b-a^2b + j a (a+2b)} \quad (5)$$

che, nell'importante caso in cui non vi sia angolo di fase fra V ed I , si riduce alla :

$$I = \frac{\omega v \Delta c}{a \left(1 + \frac{2}{a^2-1}\right)} \quad (6)$$

In tali formule, V è la tensione di alimentazione, di pulsazione ω , ed inoltre

$$C_1 = C_0 \pm \Delta C$$

$$C_2 = C_0 \mp \Delta C$$

$$a = R_1 \omega C_0$$

$$b = R_2 \omega C_0$$

L'angolo di fase è nullo per $b = \frac{a}{a^2 - 1}$.

La frequenza della tensione di alimentazione viene scelta nel campo delle radiofrequenze, cioè è dell'ordine di 1 [MHz].

B) Circuiti a modulazione di frequenza

Essi vengono usati ad esempio nelle applicazioni di telemetria, specie quando non richiedono prestazioni eccezionali; per queste ultime è invece preferibile che il segnale, anziché sotto forma di variazioni di frequenza, si presenti sotto forma di corrente continua, ad una tensione relativamente elevata (intorno ai 5 [V]). Circuiti di telemetria a modulazione di frequenza sono stati impiegati con successo per la misura della pressione agente su modelli in volo libero all'interno di gallerie a vento, ad esempio per le prove di rientro nell'atmosfera del modulo di comando della spedizione spaziale Apollo.

C) Circuiti risonanti

Essi sono costituiti dal trasduttore capacitivo e da un'induttanza fissa che, in congiunzione con un certo numero di capacità addizionali formano un circuito risonante, la cui frequenza viene misurata o paragonata a quella di un oscillatore stabilizzato di frequenza fissa. Per un funzionamento stabile si richiedono specifiche spesso eccezionali per l'oscillatore di paragone (ad esempio stabilizzazione non inferiore a 1 ciclo su 10^6) ed inoltre il dispositivo è complesso; tuttavia tale metodo è il più sensibile per la misura di variazioni di capacità.

D) Circuiti a diodi

Ci limiteremo all'esposizione del ponte a doppio T (brevetato da K.S. Lion), perchè esso si rivela uno dei migliori circuiti per trasduttori capacitivi, per alcuni vantaggi che lo rendono superiore a sistemi anche più elaborati e perchè è in grado di convertire variazioni di capacità in segnali di tensione o di corrente in corrente continua e ad alto livello. Esso è rappresentato nella figura 8, dove si è supposto che lo strumento di misura o il registratore costituiscano un carico puramente resistivo R_u e la sorgente di alimentazione (a radio frequenza, ad es. onde quadre o sinusoidali a 1,3 [MHz]) abbia im-

pedenza interna trascurabile. Nell'ipotesi in cui $R_1 = R_2 = R$ e chiamando f la frequenza, si può dimostrare che per ΔC sufficientemente piccoli risulta:

$$E_u \cong E_i f \frac{R R_u (R+2R_u)}{(R+R_u)^2} (C_1 - C_2) \quad (7)$$

cioè il legame fra tensione d'uscita e differenza di capacità è lineare.

La massima sensibilità del circuito si ha per

$$\frac{1}{k_1} = \frac{1}{k_2} = 0,57$$

dove

$$k_1 = \frac{R + R_u}{2RfC_1(R+2R_u)} \quad k_2 = \frac{R + R_u}{2RfC_2(R+2R_u)}$$

Poichè si dimostra che la (7) è verificata con un errore $< 1\%$ se $k_1 > 5$ e $k_2 > 5$, che cioè per avere buona linearità occorre $\frac{1}{k_1} < \frac{1}{5}$ e $\frac{1}{k_2} < \frac{1}{5}$, si vede che sensibilità e linearità sono grandezze contrastanti.

Fra i vantaggi di questo circuito ricordiamo il fatto che l'uscita è molto forte (ad es. da $-5[V]$ a $+5[V]$ nel campo lineare, da $-16[V]$ a $+16[V]$ al di fuori di esso) e che l'impedenza d'uscita del circuito può essere resa non troppo elevata e perciò la corrente d'uscita può essere misurata direttamente con un micro o milliamperometro, o con un registratore, senza dover interporre un amplificatore e pertanto senza incremento di costo, rumore, distorsione, inoltre la sorgente di alimentazione, i condensatori e l'uscita sono messi a terra; i diodi poi operano in zone della loro caratteristica lontane dall'origine e perciò nella loro zona lineare.

E) Circuiti in corrente continua

Essi sono usati per i microfoni capacitivi e sono ben noti; basti perciò la figura 9.

F) Circuiti speciali

Uno di essi si propone di ovviare ad uno dei limiti caratteristici dei trasduttori capacitivi: la nonlinearità dei trasduttori stessi. Infatti in tutti i circuiti considerati finora, anche se essi fossero stati perfettamente lineari, il legame lineare sarebbe valso solo fra capacità (differenza di capacità nel caso delle figure 7 e 8, quoziente in altri casi) e segnale d'uscita; è il trasduttore che introduce la relazione fra lo spostamento e la capacità. Se noi consideriamo ad esempio una unità differenziale piana, a variazione di distanza fra le armature, attribuendo uno spostamento δ , le due capacità diventano:

$$C_1 = K \frac{S}{d - \delta}$$

$$C_2 = K \frac{S}{d + \delta}$$

e perciò, poichè, se pensiamo di usare un circuito del tipo delle figure 7 e 8, occorre ricavare $C_1 - C_2$, si ha:

$$C_1 - C_2 = K S \frac{2\delta}{d^2 - \delta^2} \quad (8)$$

dove il legame fra $C_1 - C_2$ e lo spostamento δ è nonlineare. L'andamento è del tipo rappresentato in figura 10; i valori numerici variano da caso a caso, dipendendo da K e da S. Se si fossero usati altri circuiti, ad esempio sensibili al rapporto fra capacità, la relazione sarebbe stata diversa ma ugualmente nonlineare.

Un circuito che ovvia a tale nonlinearità deriva dal notare che quest'ultima è conseguenza, in definitiva, del fatto che la distanza d compare nella (1) al denominatore, anzichè al numeratore, e dall'estendere ai sistemi di misura una tecnica comune nei calcolatori analogici. Lo schema, rappresentato nella figura 11, prevede un amplificatore operazionale, un condensatore fisso C_1 , un trasduttore capacitivo C_2 in retroazione. Dette

$Z_i = \frac{1}{j \omega C_1}$ e $Z_u = \frac{1}{j \omega C_2}$ le impedenze di C_1 e C_2 rispettivamente, poichè nel caso di un amplificatore operazionale vale notoriamente la

$$\frac{E_u}{E_i} = - \frac{Z_u}{Z_i} \quad (9)$$

si ha :

$$\frac{E_u}{E_i} = - \frac{C_1}{C_2} = - \frac{C_1}{\frac{K S}{d}} = - A d \quad (10)$$

dove $A = \frac{C_1}{K S}$

La (10) mostra che si è così ottenuta la linearità fra tensione di uscita e spostamenti, grandi o piccoli che siano. Realizzazioni commerciali di questo tipo usano un'alimentazione sinusoidale alternata a 50 [KHz].

Fra i circuiti "speciali" merita una menzione anche quello utilizzando un trasduttore a ionizzazione, perchè utilizzato in applicazioni meccaniche per misure di pressione, spostamento, accelerazione, umidità. Uno schema è indicato in figura 12. Una alimentazione a radiofrequenza (250 [KHz] in un'applicazione commerciale) ionizza il gas rarefatto contenuto nel tubo di vetro costituente il trasduttore a ionizzazione; due elettrodi all'interno del tubo raccolgono delle cariche create dal campo elettrico; la corrente raccolta è continua ed è funzione della configurazione e del potenziale degli elettrodi, sì che una variazione di C_1 o di C_2 tende ad alterare il bilancio del campo elettrico e quindi a produrre un segnale in uscita. Si riescono a misurare cambiamenti di capacità dell'ordine di 10^{-3} [pF]; l'impedenza d'uscita è alta, dell'ordine di 1 [MΩ] e perciò in uscita è necessario un amplificatore; la nonlinearità è dell'ordine dell'1% del fondo scala.

VANTAGGI DEI TRASDUTTORI CAPACITIVI

Essi, a parere dell'autore, sono numerosi:

- la possibilità di funzionamento senza contatto meccanico e ta-

- lora senza connessione elettrica con l'organo mobile;
- la bassissima forza coercitiva;
 - la massa molto ridotta dell'elemento mobile e quindi le alte caratteristiche di risposta dinamica;
 - la semplicità meccanica;
 - la robustezza;
 - l'alta sensibilità;
 - l'alto livello del segnale d'uscita;
 - l'alto rapporto segnale/disturbo;
 - la facilità della schermatura elettrostatica;
 - la non influenza dei campi magnetici;
 - la scarsa dipendenza dalla temperatura.

Molto si potrebbe dire a proposito dei vantaggi sopra enumerati. Qui basti aggiungere che la scarsa dipendenza dalla temperatura deriva sia dal fatto che la capacità non dipende dalla conduttività degli elettrodi e quindi dalle sue alterazioni con la temperatura, sia dal fatto che il coefficiente di temperatura del dielettrico aria (che è il dielettrico più usato nei trasduuttori capacitivi) è assai più ridotto delle corrispondenti grandezze dei materiali costituenti i trasduuttori induttivi o resistivi. Se poi il dielettrico non è aria, spesso le cose non cambiano molto. Non è detto comunque che una variazione della permittività del dielettrico per effetto termico debba essere considerata come uno svantaggio: nelle misure capacitive di livello del combustibile nei serbatoi degli aerei, si trae appunto profitto dalla somiglianza della legge di variazione termica della permittività e del volume specifico del combustibile, per ricavare un'indicazione di massa anziché di volume.

SVANTAGGI DEI TRASDUTTORI CAPACITIVI

Essi sono, essenzialmente:

- l'elevatissima impedenza d'uscita;
- la nonlinearità;
- l'influenza dell'umidità e della pressione sulla permittività del dielettrico.

L'elevata impedenza d'uscita (generalmente $10 [k\Omega] + 1 [M\Omega]$, a seconda della scelta della frequenza di alimentazione) richiede un equipaggiamento di condizionamento del segnale con altissima impedenza d'ingresso. Con un'appropriata scelta di tale unità e montando il sensore in stretta vicinanza di un circuito di rivelazione o di un preamplificatore, in modo da evitare lunghi cavi, che raccoglierebbero rumori e causerebbero sensibilità alla posizione e lunghezza dei cavi stessi, l'inconveniente è eliminato. Questa vicinanza può molto spesso essere realizzata in modo soddisfacente; qualora però si riveli impossibile, sono preferibili i trasduttori induttivi.

La nonlinearità richiede molta attenzione nel progetto; se ne è già discusso in precedenza; a parere dell'autore va tuttavia messo in evidenza il fatto che, se il trasduttore capacitivo, come in molti casi, è impiegato per un controllo in ciclo chiuso di un asservimento statico di posizione, la nonlinearità ed anche un'eventuale non costanza del fattore di scala, sono di molto minore importanza.

ESEMPI

La figura 13 mostra alcuni esempi di utilizzazione; a chiarimento della figura 13 e), occorre dire che le armature dell'unità capacitiva differenziale sono costituite da una membrana M sensibile alla pressione e da due sottili strati metallici depositati sulle superfici sferiche ricavate all'interno di due dischi isolanti D.

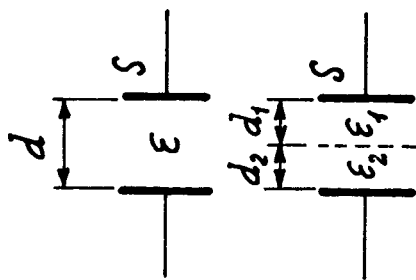
CONCLUSIONI

~~Nell'articolo~~ si è creduto di sottolineare le molteplici ragioni che sembrano mostrare la concreta opportunità di una più frequente utilizzazione di schemi contenenti trasduttori capacitivi. Attualmente la disponibilità sul mercato italiano di unità già pronte all'uso è molto ridotta, anche per la natura intrinseca dei trasduttori capacitivi, che rende spesso preferibile la

progettazione di dispositivi monoscopo a quella di dispositivi universali "general purpose"; ciononostante molti dispositivi per uso generale possono essere realizzati industrialmente senza difficoltà. Si auspica una sempre maggiore diffusione degli stessi, anche per le favorevoli conseguenze sui prezzi delle apparecchiature. A questo riguardo, tuttavia, a parere dell'autore occorre sfatare la credenza che esse siano molto costose. Se questo poteva essere vero anni addietro, non lo è più oggi, sia che si acquistino apparecchiature già pronte in commercio, sia che le si realizzi direttamente; ciò grazie ai nuovi metodi e circuiti, che hanno notevolmente ridotto la complessità ed il costo.

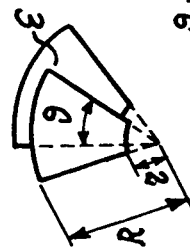
BIBLIOGRAFIA

- 1) T.G.BECKWITH, N.L.BUCK; "Mechanical Measurements", Addison-Wesley Publishing Co., 1969.
- 2) E.O. DOEBELIN, "Measurement Systems: Application and Design", Mc-Graw-Hill Book Co., 1966.
- 3) T.L. FOLDVARI, K.S.LION, "Capacitive Transducers", da "Instruments & Control Systems", Novembre 1964.
- 4) K.S.LION, "Nonlinear Twin-T Network for Capacitive Transducers," da "The Review of Scientific Instruments", Marzo 1964.
- 5) A.LUCIFREDI, "Criteri di scelta di un'apparecchiatura capacitiva per misure meccaniche" Rapp.IIR.70.AL.147
- 6) J.B.McDEVITT, D.R.HARRISON, W.K.LOCKMAN, "Measurement of Pressures and Heat Transfer by FM Telemetry", da "IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems", Vol. AES2, N.1, Gennaio 1966.
- 7) C.F.O'DONNELL, "Inertial Navigation Analysis and Design", Mc-Graw-Hill Book Co., 1964.
- 8) P.J.O'HIGGINS, "Basic Instrumentation-Industrial Measurement", Mc-Graw-Hill Book Co., 1966.
- 9) S.SMITH, "A Capacitive Measurement System for the Nondestructive Testing of Fiberglass Reinforced Plastic Laminates", Stanford University, Dept.of Aeronautics and Astronautics, SUDAAR 321, Luglio 1967.
- 10) E.T.THOMSON, "A Review of Electrical Techniques for Displacement Transducers", da "Instrumentation Technology", Gennaio 1968.
- 11) J.G. TRUXAL, "Control Engineers' Handbook" , McGraw-Hill, Book Co., 1958



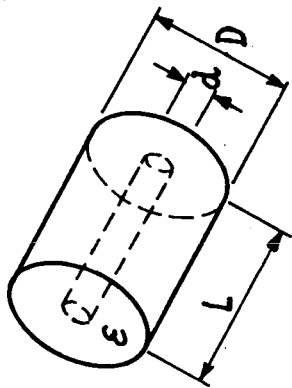
$$C = K_1 \epsilon \frac{S}{d}$$

$$C = K_1 \frac{S}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2}}$$



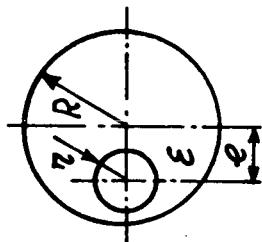
$$C = K_2 \frac{\epsilon (R^2 - r^2)}{d} \theta$$

θ = ANGOLO CORRISPONDENTE
ALLE ZONE AFFACCIAIE

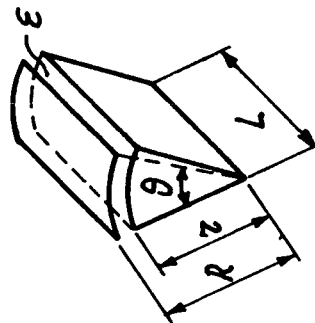


$$C = K_3 \frac{\epsilon L}{\log_{10}(\frac{D}{d})} \quad (D \gg d)$$

$$C = K_4 \frac{\epsilon L (D+d)}{D-d} \quad (D-d \ll \frac{d}{2})$$



$$C = K_5 \frac{\epsilon L}{C h^{-1} \left[1 + \frac{(R-r)^2 - e^2}{2 R r} \right]}$$



$$C = K_6 \frac{\epsilon L (R+r) \theta}{R-r} \quad (R-r \ll r)$$

Fig. 1

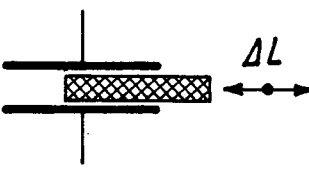
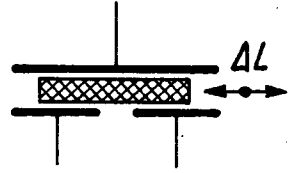
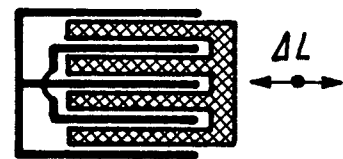

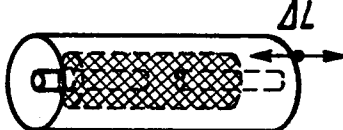
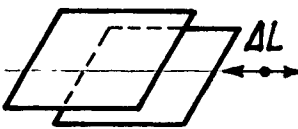

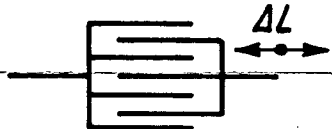
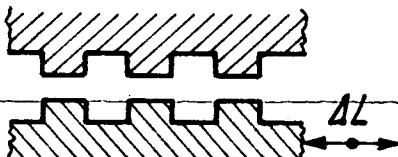
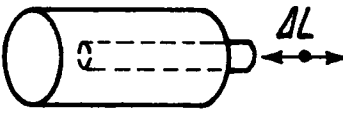
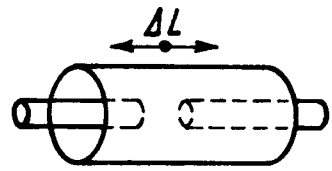
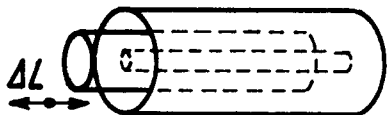
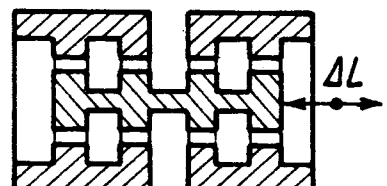
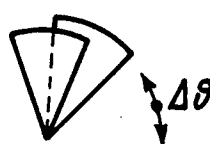




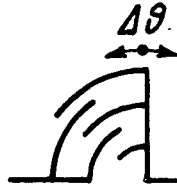
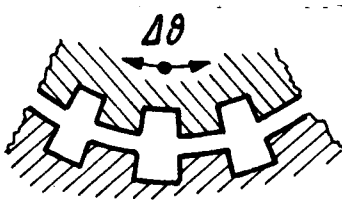
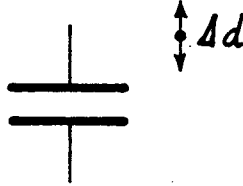
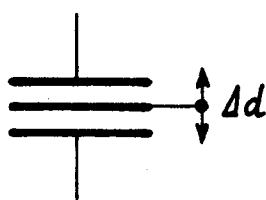
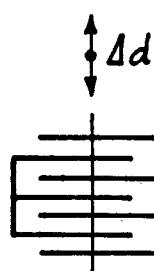
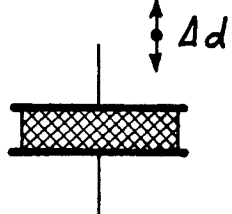
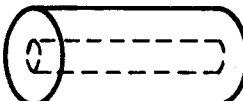
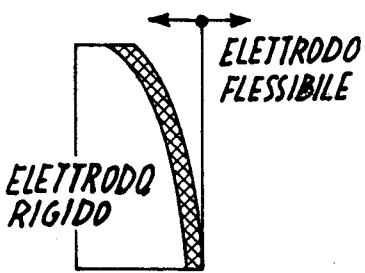
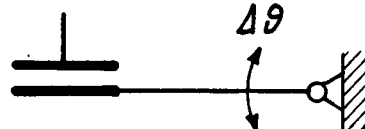
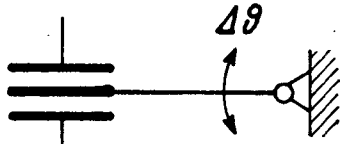
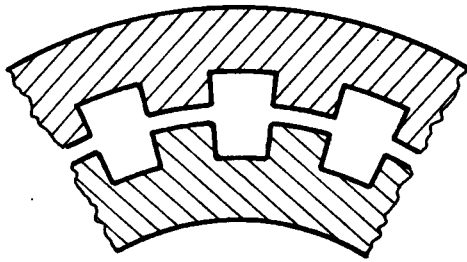
			UNITA' SINGOLA	UNITA' DIFFERENZIALE	UNITA' SINGOLA AD ARMATURE MULTIPLE	UNITA' SPECIALI
VARIAZIONI DI ϵ	SPOSTAMENTI LINEARI	UNITA' PIANA				NON USATE
		UNITA' CILINDRICA			NON USATA	NON USATE
	SPOSTAMENTI LINEARI	UNITA' PIANA				
		UNITA' CILINDRICA				
	SPOSTAMENTI ANGOLARI	UNITA' PIANA				NON USATE
		UNITA' CILINDRICA				
VARIAZIONI DI d	SPOSTAMENTI LINEARI	UNITA' PIANA				A DIELETTRICO COMPRIMIBILE 
		UNITA' CILINDRICA	 TUBO INTERNO DEFORMABILE CON LA PRESSIONE	NON USATA	NON USATA	A ROTOLAMENTO 
	SPOSTAMENTI ANGOLARI	UNITA' PIANA			NON USATA	

Fig. 2

CAPACITA' MASSIMA



CAPACITA' MINIMA

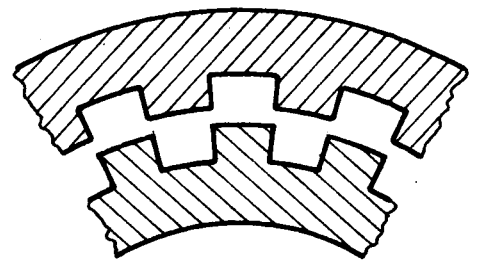


Fig. 3

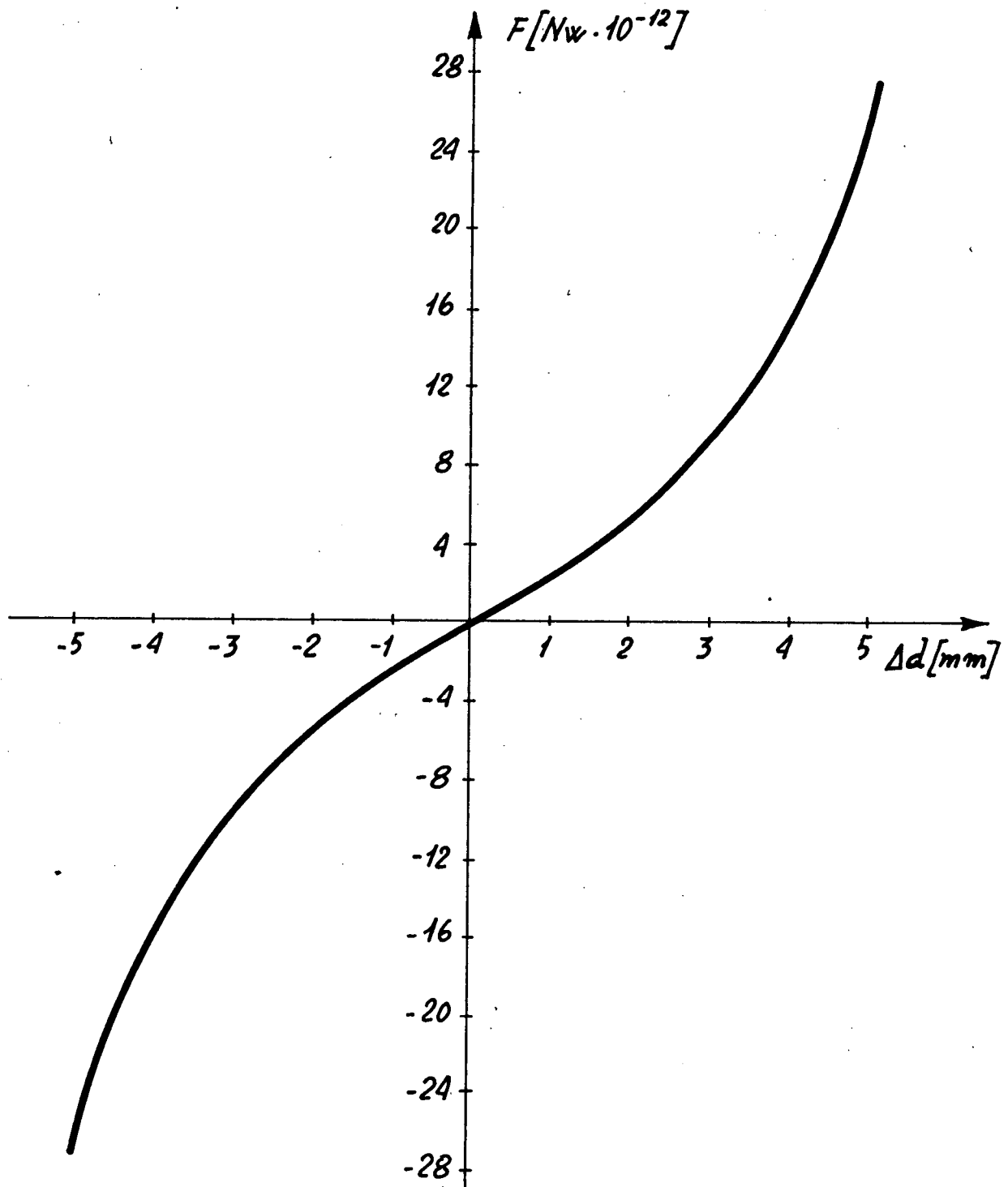


Fig. 4

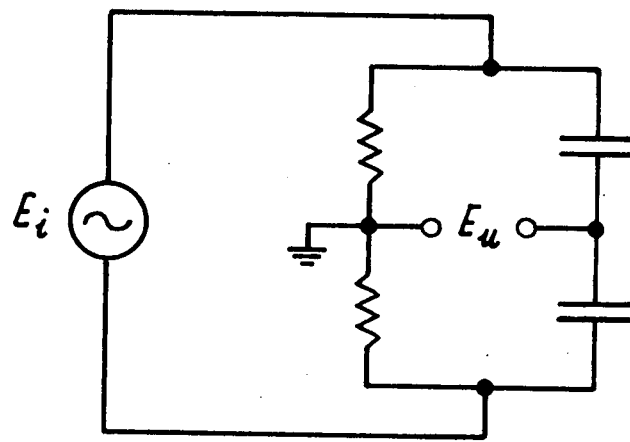
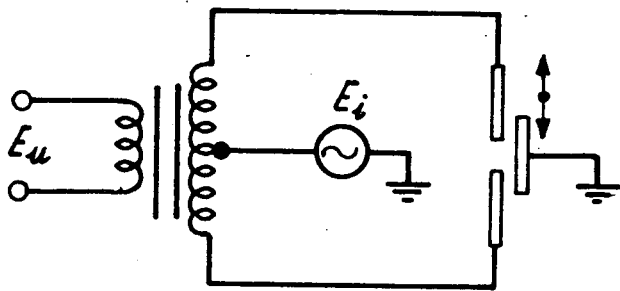
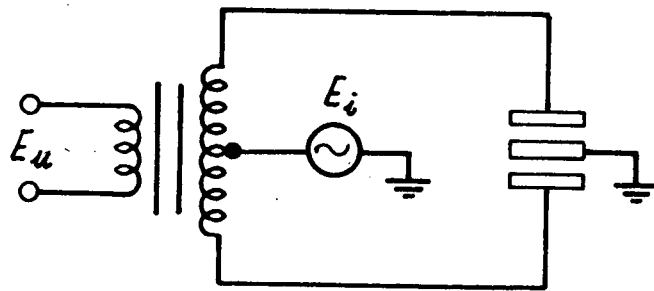


Fig. 5



a)



b)

Fig. 6

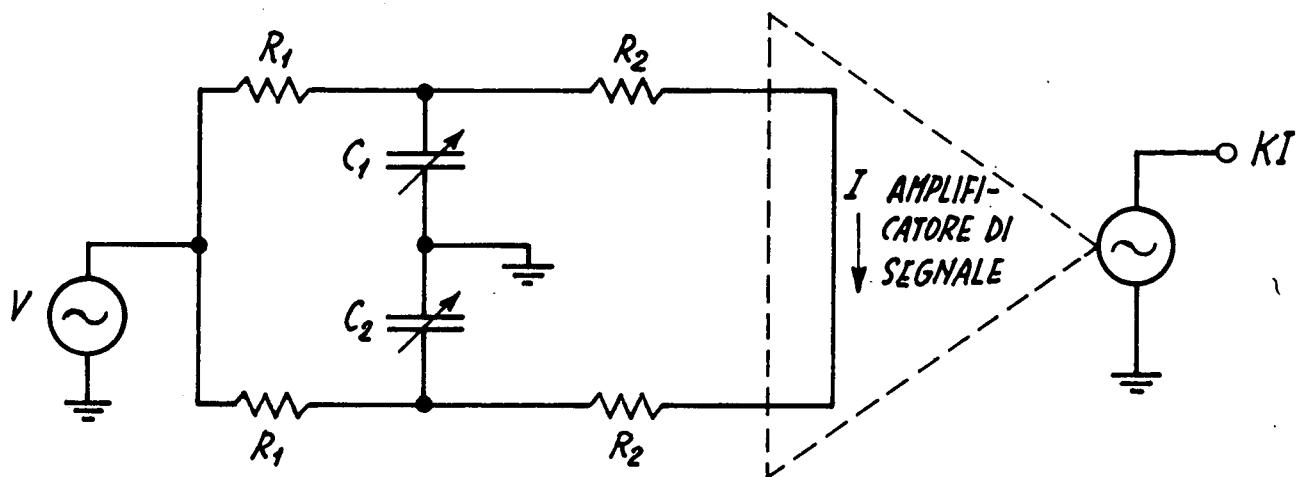


Fig. 7

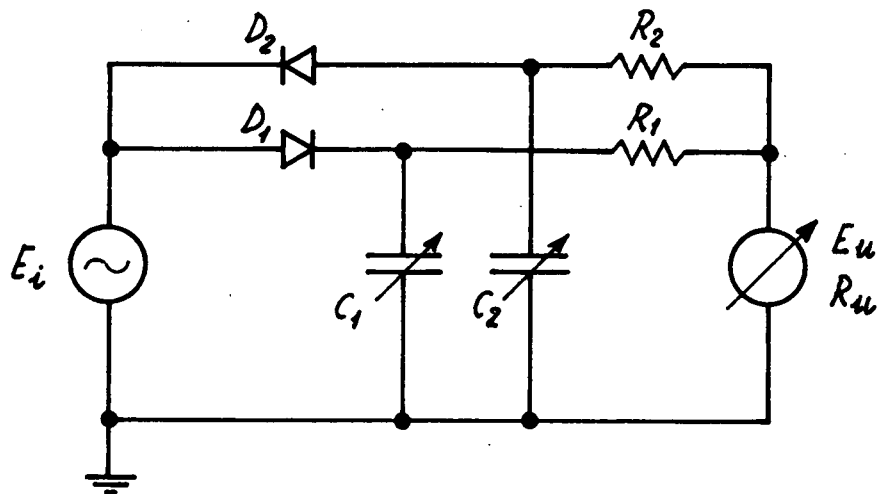


Fig. 8

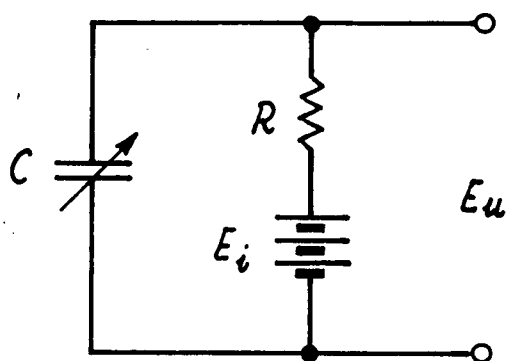


Fig. 9

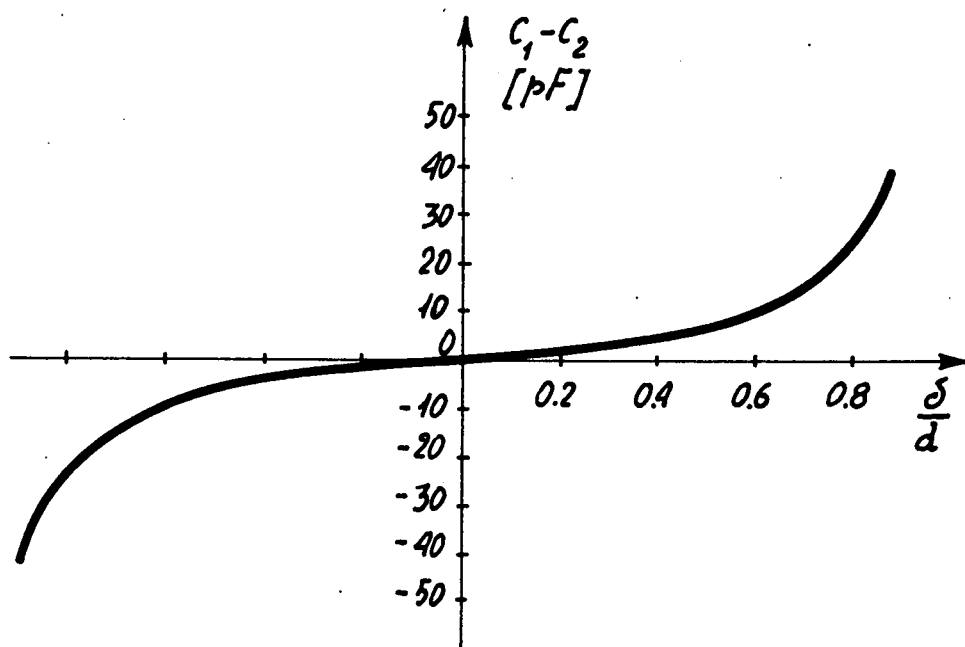


Fig. 10

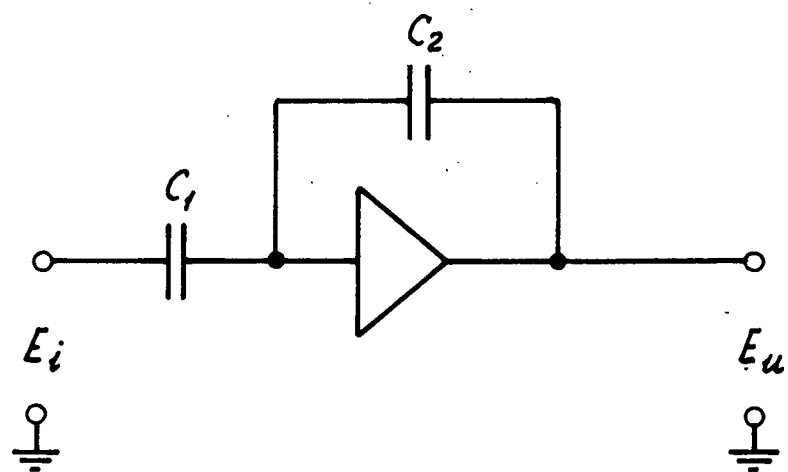


Fig. 11

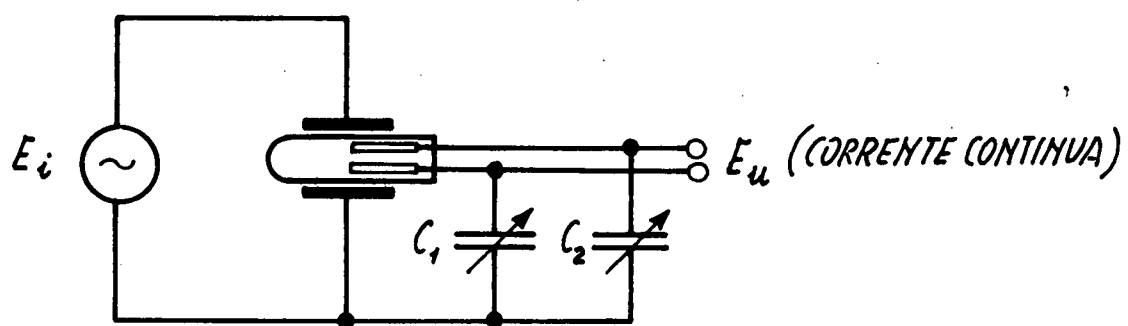


Fig. 12

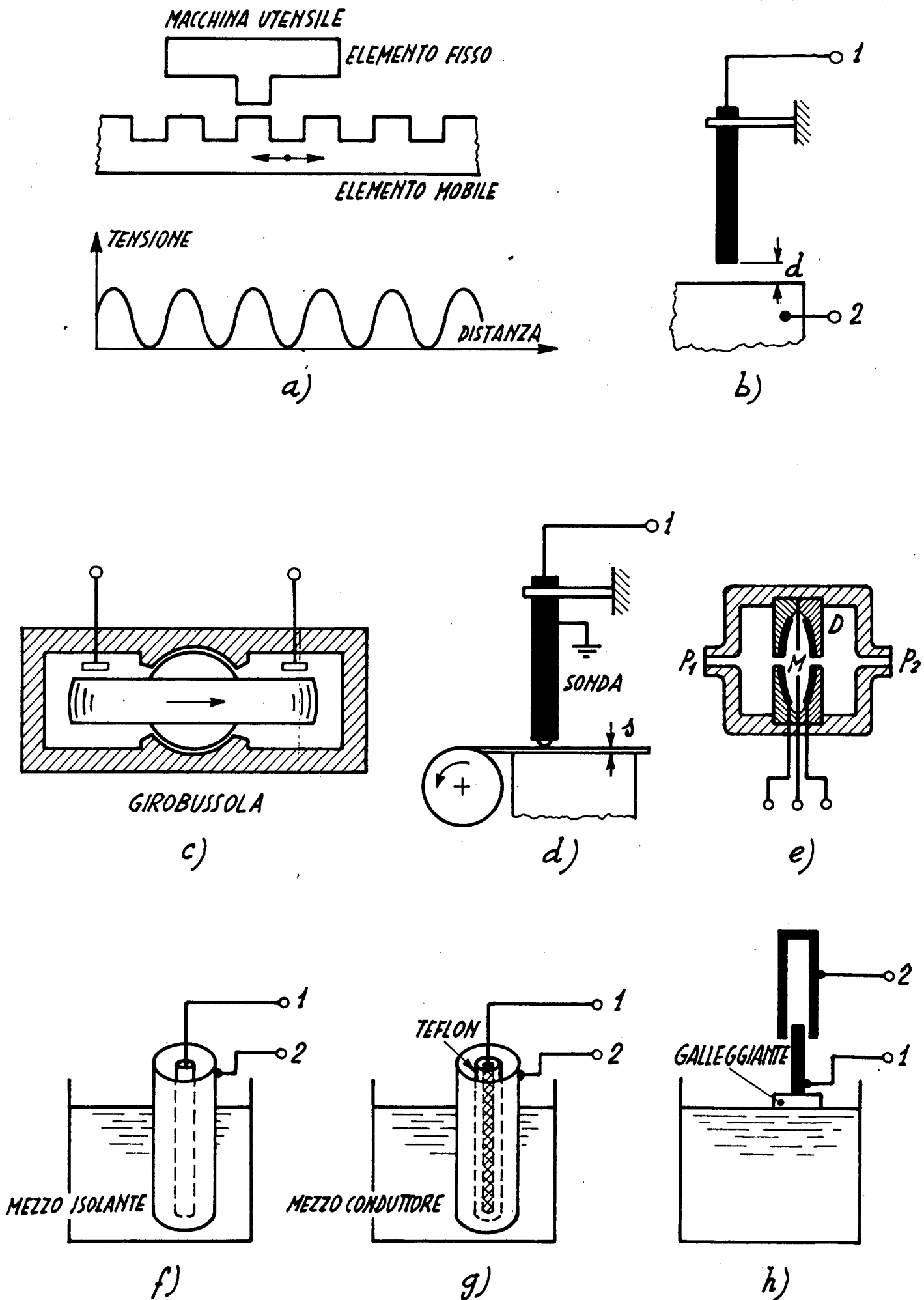


Fig. 13